Unidad IV: Diferenciación e Integración Numérica

Prof. José Luis Ramírez

April 2, 2025

Unidad IV: Diferenciación e Integración Numérica

Prof. José Luis Ramírez

April 2, 2025

Contenido

Motivación

El flujo de calor en la interfaz suelo-aire puede calcularse con la ley de Faraday

$$q = -k\rho C \frac{dT}{dz}$$

Donde $q =$ flujo de calor, $k =$ coeficiente de difusividad térmica, $\rho =$ la densidad del suelo, $C =$ calor específico del suelo.

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.
- Entonces, las soluciones numéricas son preferibles a las analíticas, siempre que la función sea fácil de evaluar.

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.
- Entonces, las soluciones numéricas son preferibles a las analíticas, siempre que la función sea fácil de evaluar.
- Problemas que han sido estudiados, involucran en cierto modo el cálculo de la derivada de una función evaluada en un punto, como por ejemplo:

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.
- Entonces, las soluciones numéricas son preferibles a las analíticas, siempre que la función sea fácil de evaluar.
- Problemas que han sido estudiados, involucran en cierto modo el cálculo de la derivada de una función evaluada en un punto, como por ejemplo:
    1. Interpolación Cúbica de Trazador Sujeto.

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.
- Entonces, las soluciones numéricas son preferibles a las analíticas, siempre que la función sea fácil de evaluar.
- Problemas que han sido estudiados, involucran en cierto modo el cálculo de la derivada de una función evaluada en un punto, como por ejemplo:
    1. Interpolación Cúbica de Trazador Sujeto.
    2. Método de Newton-Raphson.

Motivación

- Las situaciones en las cuales se requiere el uso de la diferenciación numérica, ocurren cuando el conjunto de datos está dado en la forma discreta y cuando la función que se va a derivar es complicada, por lo que la derivación analítica es difícil, cuando no imposible.
- Entonces, las soluciones numéricas son preferibles a las analíticas, siempre que la función sea fácil de evaluar.
- Problemas que han sido estudiados, involucran en cierto modo el cálculo de la derivada de una función evaluada en un punto, como por ejemplo:
    1. Interpolación Cúbica de Trazador Sujeto.
    2. Método de Newton-Raphson.
    3. Ecuaciones Diferenciales.

Motivación

Hay distintas razones por la que la integración numérica se realiza.

Motivación

Hay distintas razones por la que la integración numérica se realiza.

- El integrando $f(x)$ puede ser conocido solamente en ciertos puntos, tales como: obtenidos por muestreo. Algunos sistemas encajados y otras aplicaciones informáticas pueden necesitar la integración numérica por esta razón.

Motivación

Hay distintas razones por la que la integración numérica se realiza.

- El integrando $f(x)$ puede ser conocido solamente en ciertos puntos, tales como: obtenidos por muestreo. Algunos sistemas encajados y otras aplicaciones informáticas pueden necesitar la integración numérica por esta razón.
- Un fórmula para el integrando puede ser conocido, pero puede ser difícil o imposible de encontrar su antiderivada. Un ejemplo de tal integrando es $f(x) = e^{-x^2}$, cuya antiderivada no se puede escribir en forma elemental.

Motivación

Hay distintas razones por la que la integración numérica se realiza.

- El integrando $f(x)$ puede ser conocido solamente en ciertos puntos, tales como: obtenidos por muestreo. Algunos sistemas encajados y otras aplicaciones informáticas pueden necesitar la integración numérica por esta razón.
- Un fórmula para el integrando puede ser conocido, pero puede ser difícil o imposible de encontrar su antiderivada. Un ejemplo de tal integrando es $f(x) = e^{-x^2}$, cuya antiderivada no se puede escribir en forma elemental.
- Puede ser posible encontrar una antiderivada simbólicamente, pero puede ser más fácil computar una aproximación numérica que computar la antiderivada. Ése puede ser el caso si la antiderivada se da como una serie o producto infinita, o si su evaluación requiere una función especial la cuál no está disponible.

Diferenciación Numérica

- La diferenciación numérica puede calcularse usando la definición de derivada

$$f'(x_0) = \lim_{h \to 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

Diferenciación Numérica

- La diferenciación numérica puede calcularse usando la definición de derivada

$$f'(x_0) = \lim_{h \to 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

- Tomando una h pequeña. Si $h > 0$ se llama fórmula de diferencia progresiva, si $h < 0$ se llama fórmula de diferencia regresiva.

Diferenciación Numérica

- Para calcular la aproximación numérica de la derivada en un punto, se puede generar una sucesión $\{h_k\}$, tal que $h_k \to 0$ y se calcula el cociente

$$D_k = \frac{f(x_0 + h_k) - f(x_0)}{h_k} = \frac{f_k - f_0}{h_k}$$

- Si se toma un valor muy grande de h_k la aproximación no es aceptable y si h_k es muy pequeño la diferencia $f(x + h_k) - f(x) \approx 0$ ocurre una pérdida de dígitos significativos

Diferenciación Numérica

- Para calcular la aproximación numérica de la derivada en un punto, se puede generar una sucesión $\{h_k\}$, tal que $h_k \to 0$ y se calcula el cociente

$$D_k = \frac{f(x_0 + h_k) - f(x_0)}{h_k} = \frac{f_k - f_0}{h_k}$$

- Generando entonces una sucesión $D_1, D_2, D_3, \ldots, D_n$ y tomando a D_n como la aproximación deseada, el problema está en conocer cual valor de h_k garantiza una buena aproximación
- Si se toma un valor muy grande de h_k la aproximación no es aceptable y si h_k es muy pequeño la diferencia $f(x + h_k) - f(x) \approx 0$ ocurre una pérdida de dígitos significativos

Diferenciación Numérica

- La siguiente tabla muestra los cocientes D_k para aproximar la derivada de $f(x) = \sin(x)$ en $x = 2$ cuyo valor con nueve cifras significativas es $f'(2) = -0.416146837$.

h_k	f_k	$f_k - f$	$\frac{f_k - f}{h_k}$
10^{-1}	0.8632093666	-0.0460880602	-0.4608806018
10^{-2}	0.9050905633	-0.0042068635	-0.4206863500
10^{-3}	0.9088808254	-0.0004166014	-0.4166014159
10^{-4}	0.9092558076	-0.0000416192	-0.4161923007
10^{-5}	0.9092932653	-0.0000041615	-0.4161513830
10^{-6}	0.9092970107	-0.0000004161	-0.4161472913
10^{-7}	0.9092973852	-0.0000000416	-0.4161468814
10^{-8}	0.9092974227	-0.0000000042	-0.4161468392
10^{-9}	0.9092974264	-0.0000000004	-0.4161468947
10^{-10}	0.9092974268	-0.0000000000	-0.4161471168

Table: Aproximación del $(\sin(2))' = cos(2)$.

Diferenciación Numérica

- ¿Cuán buena es esta aproximación de la derivada? Por el Teorema de Taylor se sabe que:

$$f(x_0+h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{f''(\xi_h)h^2}{2}$$

  donde ξ_h está entre x_0 y x_0+h.

- Despejando ahora a $f'(x_0)$ en esta fórmula se tiene que:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} - \frac{hf''(\xi_h)}{2}$$

- Esta fórmula nos dice que se aproxima a $f'(x_0)$ con un error proporcional a h, es decir, $f'(x_0) \approx O(h)$.

Diferenciación Numérica

Ejemplo:

Tomando $f(x) = x^9$ se desea aproximar $f'(1)$ cuyo valor exacto es nueve. En la siguiente figura se ilustran los errores absolutos como función de h en escala logarítmica.

Diferenciación Numérica

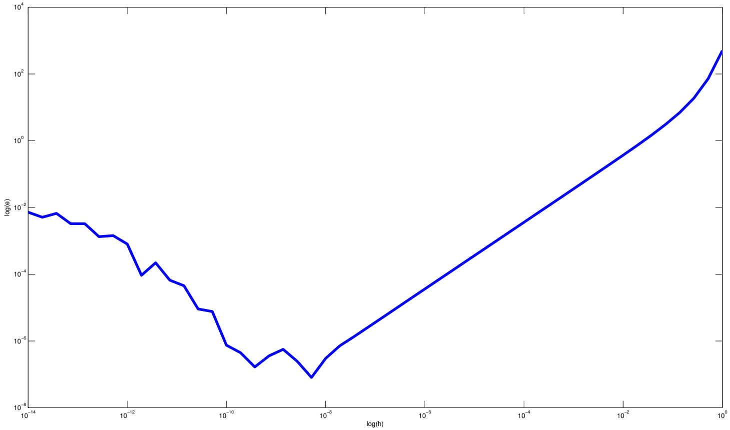


Figure: Aproximación de $f'(1)$ para $f(x) = x^9$.

Diferenciación Numérica

Se puede ver que los errores disminuyen hasta un cierto valor crítico h_{min} luego del cual los errores aumentan según la h disminuye. ¿Contradice esto el resultado de arriba de $O(h)$ del error?

Diferenciación Numérica

Se puede ver que los errores disminuyen hasta un cierto valor crítico h_{min} luego del cual los errores aumentan según la h disminuye. ¿Contradice esto el resultado de arriba de $O(h)$ del error?

- El resultado anterior es sobre la convergencia si la aritmética es exacta y se dice que es un resultado asintótico.

Diferenciación Numérica

Se puede ver que los errores disminuyen hasta un cierto valor crítico h_{min} luego del cual los errores aumentan según la h disminuye. ¿Contradice esto el resultado de arriba de $O(h)$ del error?

- El resultado anterior es sobre la convergencia si la aritmética es exacta y se dice que es un resultado asintótico.
- La figura ilustra los efectos de redondeo debido a la aritmética finita, los cuales se hacen significativos para h pequeño y pueden afectar cualquier fórmula numérica para aproximar la derivada.

Diferenciación Numérica

Definición:

El error de truncamiento se define como:

$$E = |Du(x) - u'(x)|$$

donde $u'(x)$ es la derivada y $Du(x)$ es su aproximación. Además, si $E \leq Ch^p$, se dice que el esquema $Du(x)$ tiene un orden de precisión p, $O(h^p)$, siempre que C sea una constante, la cual usualmente depende de la regularidad de $u(x)$.

Diferenciación Numérica

- Una fórmula con un grado de aproximación digamos $O(h^2)$ es preferible a una de $O(h)$

Diferenciación Numérica

- Una fórmula con un grado de aproximación digamos $O(h^2)$ es preferible a una de $O(h)$
- ya que los errores (teóricos) tienden a cero más rápido y así la h no se tiene que hacerse tan pequeña reduciendo así los efectos de los errores por la aritmética finita.

Diferenciación Numérica

- Una fórmula con un grado de aproximación digamos $O(h^2)$ es preferible a una de $O(h)$
- ya que los errores (teóricos) tienden a cero más rápido y así la h no se tiene que hacerse tan pequeña reduciendo así los efectos de los errores por la aritmética finita.
- Es posible, mejorar la precisión de la siguiente manera: Sean los polinomios de Taylor de las funciones $f(x_0+h)$ y $f(x_0-h)$, suponiendo que la función es al menos tres veces derivable:

$$f(x_0+h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2}h^2 + \frac{f'''(\xi_1)}{6}h^3$$
$$f(x_0-h) = f(x_0) - f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2}h^2 - \frac{f'''(\xi_2)}{6}h^3$$

Diferenciación Numérica

- Restando ambas ecuaciones y resolviendo para $f'(x_0)$:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0+h) - f(x_0-h)}{2h} - \frac{h^2}{12}(f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2))$$

Diferenciación Numérica

- Restando ambas ecuaciones y resolviendo para $f'(x_0)$:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0+h) - f(x_0-h)}{2h} - \frac{h^2}{12}(f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2))$$

- Como $f \in \mathcal{C}^3[x_0-h, x_0+h]$, entonces por el teorema del valor intermedio existe $\xi \in [x_0-h, x_0+h]$ tal que,

$$f'''(\xi) = \frac{f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)}{2}$$

Diferenciación Numérica

- Por lo anterior queda entonces que:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0+h) - f(x_0-h)}{2h} - \frac{f'''(\xi)}{6}h^2$$

Diferenciación Numérica

- Por lo anterior queda entonces que:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} - \frac{f'''(\xi)}{6}h^2$$

- A esta expresión se le llama fórmula de diferencia centrada, el orden de precisión es 2, mientras que el error de truncamiento es $O(h^2)$.

Diferenciación Numérica

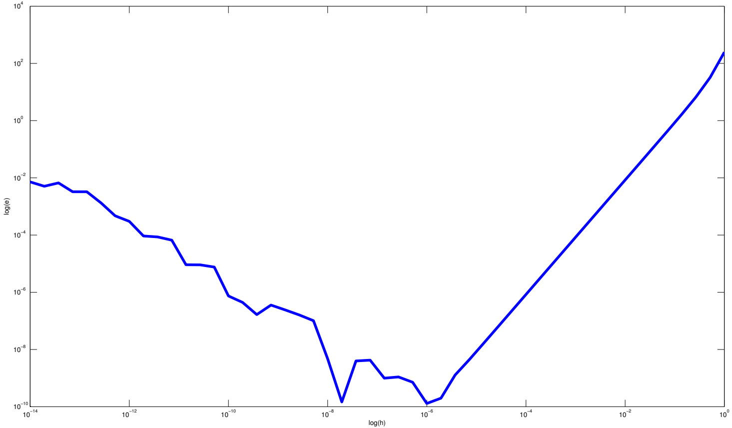


Figure: Aproximación de $f'(1)$ para $f(x) = x^9$.

Fórmula de los n puntos.

El siguiente teorema utiliza el polinomio interpolador de una función f para obtener fórmulas de aproximación a la derivada de una función f.

Fórmula de los n puntos.

El siguiente teorema utiliza el polinomio interpolador de una función f para obtener fórmulas de aproximación a la derivada de una función f.

Teorema 1 (fórmula de n puntos)

Sea f una función de clase $C^{n+1}[a, b]$ y $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ n puntos distintos de dicho intervalo. Si llamamos $L_i(x)$ a los correspondientes polinomios elementales de Lagrange de grado $n-1$, entonces existe un punto $\xi \in [a, b]$ tal que

$$f'(x_k) = \sum_{i=1}^{n} f(x_i) L_i'(x_k) + \frac{f^{(n)}(\xi)}{n!} \prod_{i=1, i\neq k}^{n} (x_k - x_i)$$

Fórmula de los n puntos.

- El polinomio de segundo grado que interpola a f en los puntos x_0, x_1, x_2, tiene por polinomios elementales:

Fórmula de los n puntos.

- El polinomio de segundo grado que interpola a f en los puntos x_0, x_1, x_2, tiene por polinomios elementales:

$$L_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} \Rightarrow L_0'(x) = \frac{(x - x_2) + (x - x_1)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)}$$

Fórmula de los n puntos.

- El polinomio de segundo grado que interpola a f en los puntos x_0, x_1, x_2, tiene por polinomios elementales:

$$L_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} \Rightarrow L_0'(x) = \frac{(x - x_2) + (x - x_1)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)}$$

$$L_1(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} \Rightarrow L_1'(x) = \frac{(x - x_2) + (x - x_0)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)}$$

Fórmula de los n puntos.

- El polinomio de segundo grado que interpola a f en los puntos x_0, x_1, x_2, tiene por polinomios elementales:

$$L_0(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} \Rightarrow L_0'(x) = \frac{(x-x_2)+(x-x_1)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}$$
$$L_1(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} \Rightarrow L_1'(x) = \frac{(x-x_2)+(x-x_0)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}$$
$$L_2(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \Rightarrow L_2'(x) = \frac{(x-x_1)+(x-x_0)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}$$

Fórmula de los n puntos

- De esta manera, siguiendo el teorema anterior, se tendría que:

$$f'(x_k) = \frac{f(x_0)[(x_k - x_2) + (x_k - x_1)]}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)[(x_k - x_2) + (x_k - x_0)]}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)}$$

$$+ \frac{f(x_2)[(x_k - x_1) + (x_k - x_0)]}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq k}^{2} (x_k - x_i)$$

$$\forall k = 0, 1, 2$$

Fórmula centrada de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_1 - h$, $x_1 = x_1$ y $x_2 = x_1 + h$ para aproximar $f'(x_1)$, nos queda que:

$$f'(x_1) = \frac{f(x_0)(x_1 - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)[(x_1 - x_2) + (x_1 - x_0)]}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + \frac{f(x_2)(x_1 - x_0)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i \neq 1}^{2} (x_1 - x_i)$$

Fórmula centrada de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_1 - h$, $x_1 = x_1$ y $x_2 = x_1 + h$ para aproximar $f'(x_1)$, nos queda que:

$$f'(x_1) = \frac{f(x_0)(x_1 - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)[(x_1 - x_2) + (x_1 - x_0)]}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + \frac{f(x_2)(x_1 - x_0)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq 1}^{2} (x_1 - x_i)$$

Sustituyendo x_0 y x_2, y simplificando la expresión se obtiene:

$$f'(x_1) = \frac{f(x_1 + h) - f(x_1 - h)}{2h} - \frac{f'''(\xi)}{6} h^2$$

Fórmula progresiva de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_0$, $x_1 = x_0 + h$ y $x_2 = x_0 + 2h$ para aproximar $f'(x_0)$ con $h > 0$, queda que:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0)[(x_0 - x_2) + (x_0 - x_1)]}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)(x_0 - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + \frac{f(x_2)(x_0 - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq 0}^{2} (x_0 - x_i)$$

Fórmula progresiva de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_0$, $x_1 = x_0 + h$ y $x_2 = x_0 + 2h$ para aproximar $f'(x_0)$ con $h > 0$, queda que:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0)[(x_0 - x_2) + (x_0 - x_1)]}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)(x_0 - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + \frac{f(x_2)(x_0 - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq 0}^{2} (x_0 - x_i)$$

Sustituyendo x_1 y x_2, y simplificando la expresión se obtiene:

$$f'(x_0) = \frac{-3f(x_0) + 4f(x_0 + h) - f(x_0 + 2h)}{2h} + \frac{f'''(\xi)}{3} h^2$$

Fórmula regresiva de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_2 - 2h$, $x_1 = x_2 - h$ y $x_2 = x_2$ para aproximar $f'(x_2)$ con $h > 0$, queda que:

$$f'(x_2) = \frac{f(x_0)(x_2 - x_1)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)(x_2 - x_0)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)}$$
$$+ \frac{f(x_2)[(x_2 - x_1) + (x_2 - x_0)]}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq 2}^{2} (x_2 - x_i)$$

Fórmula regresiva de tres puntos.

Si tomamos $x_0 = x_2 - 2h$, $x_1 = x_2 - h$ y $x_2 = x_2$ para aproximar $f'(x_2)$ con $h > 0$, queda que:

$$\begin{aligned} f'(x_2) &= \frac{f(x_0)(x_2 - x_1)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + \frac{f(x_1)(x_2 - x_0)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} \\ &\quad + \frac{f(x_2)[(x_2 - x_1) + (x_2 - x_0)]}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} + \frac{f'''(\xi)}{3!} \prod_{i=0, i\neq 2}^{2} (x_2 - x_i) \end{aligned}$$

Sustituyendo x_0 y x_1, y simplificando la expresión se obtiene:

$$f'(x_2) = \frac{f(x_2 - 2h) - 4f(x_2 - h) + 3f(x_2)}{2h} + \frac{f'''(\xi)}{3}h^2$$

Derivadas de Orden Superior

- A partir del desarrollo de Taylor de la función evaluada en $x_0 + h$ y $x_0 - h$, se puede obtener la fórmula para la que aproxima a la segunda derivada de la función f.

Derivadas de Orden Superior

- A partir del desarrollo de Taylor de la función evaluada en $x_0 + h$ y $x_0 - h$, se puede obtener la fórmula para la que aproxima a la segunda derivada de la función f.
- Sea $0 < |h| < \delta$ por Taylor, suponiendo que $f^{(4)}$ existe y es continua en $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$, ξ_1 entre x_0 y $x_0 + h$, ξ_2 entre x_0 y $x_0 - h$.

Derivadas de Orden Superior

- A partir del desarrollo de Taylor de la función evaluada en $x_0 + h$ y $x_0 - h$, se puede obtener la fórmula para la que aproxima a la segunda derivada de la función f.
- Sea $0 < |h| < \delta$ por Taylor, suponiendo que $f^{(4)}$ existe y es continua en $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$, ξ_1 entre x_0 y $x_0 + h$, ξ_2 entre x_0 y $x_0 - h$.

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2}h^2 + \frac{f'''(x_0)}{6}h^3 + \frac{f^{(4)}(\xi_1)}{24}h^4$$

$$f(x_0 - h) = f(x_0) - f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2}h^2 - \frac{f'''(x_0)}{6}h^3 + \frac{f^{(4)}(\xi_2)}{24}h^4$$

Derivadas de Orden Superior

- Sumandos ambas ecuaciones:

$$f(x_0+h)+f(x_0-h) = 2f(x_0)+2\frac{f''(x_0)}{2}h^2+\frac{h^4}{24}\left(f^{(4)}(\xi_1)+f^{(4)}(\xi_2)\right)$$

- y despejando $f''(x_0)$ de esta expresión se obtiene:

$$f''(x_0) = \frac{f(x_0+h)-2f(x_0)+f(x_0-h)}{h^2}+\frac{f^{(4)}(\xi)}{12}h^2$$

con $\xi \in (x_0-h, x_0+h)$

Extrapolación de Richardson

- El proceso de obtener una estimación mejorada para el valor de Integrales, Derivadas, Ecuaciones Diferenciales, etc., con base en dos o más aplicaciones de una fórmula, empleando diferentes longitudes de intervalo, se denomina Extrapolación.

Extrapolación de Richardson

- El proceso de obtener una estimación mejorada para el valor de Integrales, Derivadas, Ecuaciones Diferenciales, etc., con base en dos o más aplicaciones de una fórmula, empleando diferentes longitudes de intervalo, se denomina Extrapolación.
- Uno de los mós conocidos es el de Extrapolación de Richardson o Aproximación diferida al límite.

Extrapolación de Richardson

- El proceso de obtener una estimación mejorada para el valor de Integrales, Derivadas, Ecuaciones Diferenciales, etc., con base en dos o más aplicaciones de una fórmula, empleando diferentes longitudes de intervalo, se denomina Extrapolación.
- Uno de los mós conocidos es el de Extrapolación de Richardson o Aproximación diferida al límite.
- Supongase que $G(h)$ es una expresión que aproxima a una cantidad G

Extrapolación de Richardson

- El proceso de obtener una estimación mejorada para el valor de Integrales, Derivadas, Ecuaciones Diferenciales, etc., con base en dos o más aplicaciones de una fórmula, empleando diferentes longitudes de intervalo, se denomina Extrapolación.
- Uno de los mós conocidos es el de Extrapolación de Richardson o Aproximación diferida al límite.
- Supongase que $G(h)$ es una expresión que aproxima a una cantidad G
- entonces se tiene que $G - G(h) = E_T$, donde E_T es el error de truncamiento que se comete al aproximar a G por $G(h)$.

Extrapolación de Richardson

- Suponiendo:

$$E_T = c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 + c_4 h^4 + \cdots \ ,$$

luego

$$G = G(h) + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 + c_4 h^4 + \cdots \qquad h > 0$$

Extrapolación de Richardson

- Suponiendo:

$$E_T = c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 + c_4 h^4 + \cdots ,$$

luego

$$G = G(h) + c_1 h + c_2 h^2 + c_3 h^3 + c_4 h^4 + \cdots \qquad h > 0$$

- Tomando $h = \dfrac{h}{2}$, entonces

$$G = G\left(\frac{h}{2}\right) + c_1 \frac{h}{2} + c_2 \frac{h^2}{4} + c_3 \frac{h^3}{8} + c_4 \frac{h^4}{16} + \cdots \qquad h > 0$$

Extrapolación de Richardson

- Si se multiplica por 2 a la última ecuacióny se le resta G, entonces

$$2G-G = 2G\left(\frac{h}{2}\right)+c_1h+c_2\frac{h^2}{2}+c_3\frac{h^3}{4}+\cdots-G(h)-c_1h-c_2h^2-c_3h^3-\cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Si se multiplica por 2 a la última ecuacióny se le resta G, entonces

$$2G - G = 2G\left(\frac{h}{2}\right) + c_1 h + c_2\frac{h^2}{2} + c_3\frac{h^3}{4} + \cdots - G(h) - c_1 h - c_2 h^2 - c_3 h^3 - \cdots$$

- o sea que:

$$G = 2G\left(\frac{h}{2}\right) - G(h) - c_2\frac{h^2}{2} - c_3\frac{3h^3}{4} - c_4\frac{7h^4}{8} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Si se multiplica por 2 a la última ecuacióny se le resta G, entonces

$$2G-G = 2G\left(\frac{h}{2}\right)+c_1h+c_2\frac{h^2}{2}+c_3\frac{h^3}{4}+\cdots-G(h)-c_1h-c_2h^2-c_3h^3-\cdots$$

- o sea que:

$$G = 2G\left(\frac{h}{2}\right) - G(h) - c_2\frac{h^2}{2} - c_3\frac{3h^3}{4} - c_4\frac{7h^4}{8} - \cdots$$

- luego

$$G = \left[G\left(\frac{h}{2}\right) + \left(G\left(\frac{h}{2}\right) - G(h)\right)\right] - c_2\frac{h^2}{2} - c_3\frac{3h^3}{4} - c_4\frac{7h^4}{8} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Para simplificar los cálculos denotese $G(h) \equiv G_1(h)$, la expresión para $O(h^2)$, es entonces

$$G = G_2(h) - c_2 \frac{h^2}{2} - c_3 \frac{3h^3}{4} - c_4 \frac{7h^4}{8} - \cdots$$

donde $G_2(h) = G_1\left(\frac{h}{2}\right) + \left(G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h)\right)$

Extrapolación de Richardson

- Al igual que antes reemplazamos h por $\frac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_2\left(\frac{h}{2}\right) - c_2\frac{h^2}{8} - c_3\frac{3h^3}{32} - c_4\frac{7h^4}{128} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Al igual que antes reemplazamos h por $\dfrac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_2\left(\frac{h}{2}\right) - c_2\frac{h^2}{8} - c_3\frac{3h^3}{32} - c_4\frac{7h^4}{128} - \cdots$$

- Restando cuatro veces esta ecuación a la original se obtiene:

$$4G - G = 4G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h) - c_2\frac{h^2}{2} - c_3\frac{3h^3}{8} - \cdots + c_2\frac{h^2}{2} + c_3\frac{3h^3}{4} + \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Al igual que antes reemplazamos h por $\frac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_2\left(\frac{h}{2}\right) - c_2\frac{h^2}{8} - c_3\frac{3h^3}{32} - c_4\frac{7h^4}{128} - \cdots$$

- Restando cuatro veces esta ecuación a la original se obtiene:

$$4G - G = 4G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h) - c_2\frac{h^2}{2} - c_3\frac{3h^3}{8} - \cdots + c_2\frac{h^2}{2} + c_3\frac{3h^3}{4} + \cdots$$

- o sea que

$$3G = 4G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h) + c_3\frac{3h^3}{8} + c_4\frac{21h^4}{32} + \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- luego

$$G = \left[G_2\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h)}{3} \right] + c_3\frac{h^3}{8} + c_4\frac{7h^4}{32} + \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- luego

$$G = \left[G_2\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h)}{3} \right] + c_3\frac{h^3}{8} + c_4\frac{7h^4}{32} + \cdots$$

- Denotando

$$G_3(h) = G_2\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G_2(h)}{3}$$

se tiene la expresión para $O(h^3)$ dada por

$$G = G_3(h) + c_3\frac{h^3}{8} + c_4\frac{7h^4}{32} + \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- reemplazando h por $\dfrac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{h^3}{64}c_3 + \frac{7h^4}{512}c_4 + \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- reemplazando h por $\dfrac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{h^3}{64}c_3 + \frac{7h^4}{512}c_4 + \cdots$$

- Restando ocho veces esta ecuación a la ecuación original se tiene que

$$7G = 8G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h) - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- reemplazando h por $\dfrac{h}{2}$, se tiene que

$$G = G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{h^3}{64}c_3 + \frac{7h^4}{512}c_4 + \cdots$$

- Restando ocho veces esta ecuación a la ecuación original se tiene que

$$7G = 8G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h) - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

- o sea que

$$7G = 7G_3\left(\frac{h}{2}\right) + G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h) - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Por lo tanto

$$G = \left[G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h)}{7} \right] - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Por lo tanto

$$G = \left[G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h)}{7} \right] - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

- Así que

$$G_4(h) = G_3\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_3\left(\frac{h}{2}\right) - G_3(h)}{7}$$

genera una aproximación $O(h^4)$ dada por

$$G = G_4(h) - c_4\frac{7h^4}{64} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson

- Continuando con este proceso, la aproximación $O(h^n)$ es

$$G = \left[G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) - G_{n-1}(h)}{2^{n-1}-1} \right] + \sum_{j=1}^{n-1} c_j h^j + O(h^n)$$

Extrapolación de Richardson

- Continuando con este proceso, la aproximación $O(h^n)$ es

$$G = \left[G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) - G_{n-1}(h)}{2^{n-1}-1} \right] + \sum_{j=1}^{n-1} c_j h^j + O(h^n)$$

- donde

$$G = G_n(h) + \sum_{j=1}^{n-1} c_j h^j + O(h^n)$$

siendo

$$G_n(h) = \left[G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_{n-1}\left(\frac{h}{2}\right) - G_{n-1}(h)}{2^{n-1}-1} \right]$$

Extrapolación de Richardson

- La siguiente tabla muestra el uso de la Extrapolación de Richardson obtener una aproximación de orden 5, empleando 5 aproximaciones de orden 1

$O(h)$	$O(h^2)$	$O(h^3)$	$O(h^4)$	$O(h^5)$
$G_1(h)$				
$G_1(h/2)$	$G_2(h)$			
$G_1(h/4)$	$G_2(h/2)$	$G_3(h)$		
$G_1(h/8)$	$G_2(h/4)$	$G_3(h/2)$	$G_4(h)$	
$G_1(h/16)$	$G_2(h/8)$	$G_3(h/4)$	$G_4(h/2)$	$G_5(h)$
$\uparrow$ Medidas	$\uparrow$	Extrapolaciones		$\uparrow$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Con este procedimiento se busca mejorar las ecuaciones obtenidas anteriormente para conseguir más precisión en la estimación de la derivada de f en un punto x.

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Con este procedimiento se busca mejorar las ecuaciones obtenidas anteriormente para conseguir más precisión en la estimación de la derivada de f en un punto x.
- Supongase que $f(x)$ es de clase C^n en $[x, x+h]$. En tal caso, su desarrollo en serie de Taylor alrededor de x para los puntos $x+h$ y $x-h$ será de la forma

$$
\begin{aligned}
f(x+h) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h^k}{k!} f^{(k)}(x) \\
f(x-h) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k h^k}{k!} f^{(k)}(x)
\end{aligned}
$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Restando ambas ecuaciones, todos los términos de orden par se cancelan, resultando

$$f(x+h) - f(x-h) = 2hf'(x) + \frac{2}{3!}h^3 f'''(x) + \frac{2}{5!}h^5 f^{(5)}(x) + \cdots$$

de donde, despejando $f'(x)$,

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} - \left[\frac{1}{3!}h^2 f^{(3)}(x) + \frac{1}{5!}h^4 f^{(5)}(x) + \cdots\right]$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Lo que se puede escribir como:

$$G = G_1(h) + a_2h^2 + a_4h^4 + a_6h^6 + \cdots$$

en la que $G = f'(x)$, la función $G_1(h)$ se define como $\frac{f(x+h)-f(x-h)}{2h}$ y $a_k = \frac{-1}{(k+1)!}f^{(k+1)}(x)$.

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Lo que se puede escribir como:

$$G = G_1(h) + a_2h^2 + a_4h^4 + a_6h^6 + \cdots$$

en la que $G = f'(x)$, la función $G_1(h)$ se define como $\frac{f(x+h)-f(x-h)}{2h}$ y $a_k = \frac{-1}{(k+1)!}f^{(k+1)}(x)$.

- Dado que $G_1(h)$ es el valor para la derivada, el error depende de términos en potencias de h, siendo el término dominante el correspondiente a h^2.

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Usando el método de Richardson para conseguir que el término dominante del error sea aún más pequeño. Escribiendo la ecuación evaluándola en $h/2$, lo que da:

$$G = G_1\left(\frac{h}{2}\right) + a_2\frac{h^2}{4} + a_4\frac{h^4}{16} + a_6\frac{h^6}{64} + \cdots$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Usando el método de Richardson para conseguir que el término dominante del error sea aún más pequeño. Escribiendo la ecuación evaluándola en $h/2$, lo que da:

$$G = G_1\left(\frac{h}{2}\right) + a_2\frac{h^2}{4} + a_4\frac{h^4}{16} + a_6\frac{h^6}{64} + \cdots$$

- Restando esta ecuación multiplicada por 4 a la ecuación original, queda:

$$3G = 4G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h) - 3a_4\frac{h^4}{4} - 15a_6\frac{h^6}{16} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Usando el método de Richardson para conseguir que el término dominante del error sea aún más pequeño. Escribiendo la ecuación evaluándola en $h/2$, lo que da:

$$G = G_1\left(\frac{h}{2}\right) + a_2\frac{h^2}{4} + a_4\frac{h^4}{16} + a_6\frac{h^6}{64} + \cdots$$

- Restando esta ecuación multiplicada por 4 a la ecuación original, queda:

$$3G = 4G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h) - 3a_4\frac{h^4}{4} - 15a_6\frac{h^6}{16} - \cdots$$

- despejando la derivada G queda como:

$$G = \frac{4G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h)}{3} - a_4\frac{h^4}{4} - 5a_6\frac{h^6}{16} - \cdots$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Usando una simple combinación de $G_1(h)$ y $G_1(h/2)$, se obtiene una precisión del orden de h^4, frente al orden h^2 que presenta $G_1(h)$.

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Usando una simple combinación de $G_1(h)$ y $G_1(h/2)$, se obtiene una precisión del orden de h^4, frente al orden h^2 que presenta $G_1(h)$.
- Análogamente se puede repetir el proceso tantas veces como se quiera; el siguente paso definir $G_2(h) = \frac{4G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h)}{3}$ con lo que la ecuación evaluada en h y en $h/2$ queda

$$
\begin{aligned}
G &= G_2(h) + b_4 h^4 + b_6 h^6 + \cdots \\
G &= G_2\left(\frac{h}{2}\right) + b_4 \frac{h^4}{16} + b_6 \frac{h^6}{64} + \cdots
\end{aligned}
$$

Extrapolación de Richardson. Fórmula de tres puntos

- Se puede despejar G, multiplicando la segunda ecuación por 16 y restándole la primera:

$$L = \frac{16G_2\left(\frac{h}{2}\right) - G(h)}{15} - b_6\frac{h^6}{20} - \cdots$$

que es una estimación de $f'(x)$ con precisión de orden h^6.

Generalización

- Si denotamos $G_k(h)$ una aproximación de orden $O(h^{2k})$ a $f'(x)$ entonces se tendría:

$$f'(x) = G_k(h) + c_1 h^{2k} + c_2 h^{2k+2} + \cdots, \text{ para } k = 1, 2, 3, \ldots$$

Generalización

- Si denotamos $G_k(h)$ una aproximación de orden $O(h^{2k})$ a $f'(x)$ entonces se tendría:

$$f'(x) = G_k(h) + c_1 h^{2k} + c_2 h^{2k+2} + \cdots \text{ , para } k = 1, 2, 3, \ldots$$

- Considerando ahora $h/2$ en lugar de h se tiene:

$$f'(x) = G_k\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{c_1}{4^k} h^{2k} + \frac{c_2}{4^{k+1}} h^{2k+2} + \cdots$$

Generalización

- Si denotamos $G_k(h)$ una aproximación de orden $O(h^{2k})$ a $f'(x)$ entonces se tendría:

$$f'(x) = G_k(h) + c_1 h^{2k} + c_2 h^{2k+2} + \cdots, \text{ para } k = 1, 2, 3, \ldots$$

- Considerando ahora $h/2$ en lugar de h se tiene:

$$f'(x) = G_k\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{c_1}{4^k} h^{2k} + \frac{c_2}{4^{k+1}} h^{2k+2} + \cdots$$

- Multiplicando esta última ecuación por 4^k y restando la ecuación inicial resulta:

$$f'(x) = \frac{4^k G_k(h/2) - G_k(h)}{4^k - 1} + O(h^{2k+2})$$

Generalización

- Por tanto, si denotamos

$$G_{k+1} = \frac{4^k G_k(h/2) - G_k(h)}{4^k - 1}$$

Generalización

- Por tanto, si denotamos

$$G_{k+1} = \frac{4^k G_k(h/2) - G_k(h)}{4^k - 1}$$

- entonces se tiene que se cumple:

$$f'(x) = D_{k+1}(h) + O(h^{2k+2})$$

Ejemplo

- La fórmula en diferencias centrada para aproximar $f'(x_0)$ viene dada por:

$$f'(x_0) = \underbrace{\frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}}_{G_1(h)} - \underbrace{\frac{h^2}{6} f'''(\xi) + O(h^4)}_{\text{termino del error}}$$

Ejemplo

- La fórmula en diferencias centrada para aproximar $f'(x_0)$ viene dada por:

$$f'(x_0) = \underbrace{\frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}}_{G_1(h)} - \underbrace{\frac{h^2}{6} f'''(\xi) + O(h^4)}_{\text{termino del error}}$$

- Con el objetivo de generar una fórmula que elimine el término cuadrático

$$G_2(h) = G_1\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{G_1\left(\frac{h}{2}\right) - G_1(h)}{3}$$

$$\begin{aligned} G_2(2h) &= \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} + \frac{\frac{f(x+h)-f(x-h)}{2h} - \frac{f(x+2h)-f(x-2h)}{4h}}{3} \\ &= \frac{8f(x+h) - 8f(x-h)}{12h} + \frac{f(x+2h) - f(x-2h)}{12h} \\ &= \frac{1}{12h}\left[f(x-2h) - 8f(x-h) + 8f(x+h) - f(x+2h)\right] \end{aligned}$$

Integración Numérica

- Dada una función f definida sobre un intervalo $[a, b]$, se desea calcular
$$I(f) = \int_a^b f(x)dx$$

Integración Numérica

- Dada una función f definida sobre un intervalo $[a, b]$, se desea calcular
$$I(f) = \int_a^b f(x)dx$$
- La cuadratura o integración numérica consiste en obtener fórmulas aproximadas para calcular la integral $I(f)$ de f.

Integración Numérica

- Dada una función f definida sobre un intervalo $[a, b]$, se desea calcular

$$I(f) = \int_a^b f(x)dx$$

- La cuadratura o integración numérica consiste en obtener fórmulas aproximadas para calcular la integral $I(f)$ de f.
- Estos métodos son de gran utilidad cuando la integral no se puede calcular por métodos analíticos.

Integración vía Interpolación Polinomial

- Una estrategia útil para calcular el valor numérico de la integral dada consiste en reemplazar f por otra función g, fácil de integrar, que aproxima a f de forma adecuada.

Integración vía Interpolación Polinomial

- Una estrategia útil para calcular el valor numérico de la integral dada consiste en reemplazar f por otra función g, fácil de integrar, que aproxima a f de forma adecuada.
- Si $f \approx g$, se deduce que:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b g(x)dx$$

Integración vía Interpolación Polinomial

- Una estrategia útil para calcular el valor numérico de la integral dada consiste en reemplazar f por otra función g, fácil de integrar, que aproxima a f de forma adecuada.
- Si $f \approx g$, se deduce que:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b g(x)dx$$

- Los polinomios son buenos candidatos para el papel de g. De hecho, g puede ser un polinomio que interpola a f en cierto conjunto de nodos.

Integración vía Interpolación Polinomial

- Supóngase que se desea calcular la integral $I(f)$. Dado una serie de nodos, $x_0, x_1, \dots, x_n$ en el intervalo $[a, b]$ se inicia un proceso de interpolación de Lagrange.

Integración vía Interpolación Polinomial

- Supóngase que se desea calcular la integral $I(f)$. Dado una serie de nodos, $x_0, x_1, \ldots, x_n$ en el intervalo $[a, b]$ se inicia un proceso de interpolación de Lagrange.
- El polinomio de grado menor o igual a n que interpola a f en los nodos es:

$$p(x) = \sum_{i=0}^{n} f(x_i) L_i(x)$$

Integración vía Interpolación Polinomial

- Supóngase que se desea calcular la integral $I(f)$. Dado una serie de nodos, $x_0, x_1, \ldots, x_n$ en el intervalo $[a, b]$ se inicia un proceso de interpolación de Lagrange.
- El polinomio de grado menor o igual a n que interpola a f en los nodos es:
$$p(x) = \sum_{i=0}^{n} f(x_i) L_i(x)$$
- La integral se puede escribir entonces como:
$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b p(x)dx = \sum_{i=0}^{n} \int_a^b f(x_i) L_i(x)dx$$

Integración vía Interpolación Polinomial

- Es decir, tenemos una fórmula general que se puede emplear para cualquier f y que tiene la forma:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=0}^{n} A_i f(x_i)$$

en donde

$$A_i = \int_a^b L_i(x)dx$$

Regla del Trapecio

- Empleando un polinomio de grado $n = 1$ y tomamos como nodos $x_0 = a$ y $x_1 = b$, se tiene el caso más sencillo posible, en donde los polinomios de interpolación son:

$$
\begin{aligned}
L_0(x) &= \frac{b-x}{b-a} \\
L_1(x) &= \frac{x-a}{b-a}
\end{aligned}
$$

Regla del Trapecio

- Empleando un polinomio de grado $n = 1$ y tomamos como nodos $x_0 = a$ y $x_1 = b$, se tiene el caso más sencillo posible, en donde los polinomios de interpolación son:

$$\begin{aligned} L_0(x) &= \frac{b-x}{b-a} \\ L_1(x) &= \frac{x-a}{b-a} \end{aligned}$$

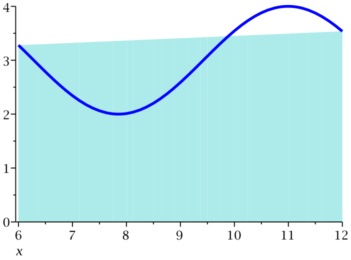
- por lo que:

$$A_0 = \int_a^b L_0(x)dx = \frac{b-a}{2} = \int_a^b L_1(x)dx = A_1$$

Regla del Trapecio

- La fórmula de cuadratura correspondiente, tomando $h = b - a$, es:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}[f(a) + f(b)] = \frac{h}{2}\left(f(a) + f(b)\right)$$



Regla del Trapecio

- Se tiene entonces que:

$$I = \int_a^b f(x)dx = \frac{h}{2}(f(a) + f(b)) + E$$

donde el error de la integración numérica E será:

$$\begin{aligned} E = \int_a^b \epsilon(x)dx &= \int_a^b \frac{f''(\xi)}{2}(x-a)(x-b) \\ &= \frac{1}{2}\int_a^b f''(\xi_x)(x-a)(x-b)dx \end{aligned}$$

Regla del Trapecio

Teorema del Valor Medio Ponderado para Integrales

Sea $f \in C[a, b]$, g integrable en $[a, b]$ y g no cambia de signo en $[a, b]$, entonces $\exists c \in (a, b)$ tal que

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c) \int_a^b g(x)dx$$

Regla del Trapecio

- $f''(\xi_x)$ es continua en el intervalo $[a, b]$ y $g(x) = (x - a)(x - b)$ es integrable en $[a, b]$ y no cambia de signo en $[a, b]$.

Regla del Trapecio

- $f''(\xi_x)$ es continua en el intervalo $[a, b]$ y $g(x) = (x - a)(x - b)$ es integrable en $[a, b]$ y no cambia de signo en $[a, b]$.
- Por tanto se puede aplicar TVMP, quedando:

$$E = \int_a^b \epsilon(x)dx = \int_a^b \frac{f''(\xi_x)}{2}(x-a)(x-b) = \frac{f''(\xi)}{2}\int_a^b (x-a)(x-b)dx$$

Regla del Trapecio

- $f''(\xi_x)$ es continua en el intervalo $[a,b]$ y $g(x)=(x-a)(x-b)$ es integrable en $[a,b]$ y no cambia de signo en $[a,b]$.
- Por tanto se puede aplicar TVMP, quedando:

$$E=\int_a^b \epsilon(x)dx=\int_a^b \frac{f''(\xi_x)}{2}(x-a)(x-b)=\frac{f''(\xi)}{2}\int_a^b (x-a)(x-b)dx$$

- Integrando la expresión anterior, se concluye que:

$$E=-\frac{h^3}{12}f''(\xi)\Rightarrow |E|\leq\left|\frac{h^3}{12}M_2\right|$$

siendo M_2 el valor máximo que alcance la derivada segunda de la función en el intervalo dado $[a,b]$.

Regla del Trapecio

- $f''(\xi_x)$ es continua en el intervalo $[a, b]$ y $g(x) = (x - a)(x - b)$ es integrable en $[a, b]$ y no cambia de signo en $[a, b]$.
- Por tanto se puede aplicar TVMP, quedando:

$$E = \int_a^b \epsilon(x)dx = \int_a^b \frac{f''(\xi_x)}{2}(x-a)(x-b) = \frac{f''(\xi)}{2}\int_a^b (x-a)(x-b)dx$$

- Integrando la expresión anterior, se concluye que:

$$E = -\frac{h^3}{12}f''(\xi) \Rightarrow |E| \leq \left|\frac{h^3}{12}M_2\right|$$

siendo M_2 el valor máximo que alcance la derivada segunda de la función en el intervalo dado $[a, b]$.

- Por tanto, se trata de una fórmula exacta para polinomios de orden uno.

Regla de Simpson

- Otra forma de obtener una estimación más exacta de un integral es con el uso de polinomios de orden superior.

Regla de Simpson

- Otra forma de obtener una estimación más exacta de un integral es con el uso de polinomios de orden superior.
- Aplicando Taylor en los punto $x_0 = a$, $x_1 = (a+b)/2$, $x_2 = b$, y denotando h al espaciado entre los extremos y el punto medio.

$$f(x) = f(x_1) + f'(x_1)(x-x_1) + \frac{f''(x_1)}{2}(x-x_1)^2 + \frac{f'''(x_1)}{6}(x-x_1)^3 + \frac{f^{(4)}(\xi_x)}{24}(x-x_1)^4$$

Regla de Simpson

- Otra forma de obtener una estimación más exacta de un integral es con el uso de polinomios de orden superior.
- Aplicando Taylor en los punto $x_0 = a$, $x_1 = (a+b)/2$, $x_2 = b$, y denotando h al espaciado entre los extremos y el punto medio.

$$f(x) = f(x_1) + f'(x_1)(x - x_1) + \frac{f''(x_1)}{2}(x - x_1)^2 + \frac{f'''(x_1)}{6}(x - x_1)^3 + \frac{f^{(4)}(\xi_x)}{24}(x - x_1)^4$$

- Integrando $f(x)$ en el intervalo $[a, b]$ queda:

$$\int_a^b f(x)dx = 2hf(x_1) + f''(x_1)\frac{h^3}{3} + \underbrace{\frac{1}{24}\int_a^b f^{(4)}(\xi_x)(x - x_1)^4 dx}_{E}$$

Regla de Simpson

- Por el teorema del valor medio ponderado existe $\xi \in [a, b]$, tal que

$$\frac{1}{24}\int_a^b f^{(4)}(\xi_x)(x-x_1)^4dx = \frac{f^{(4)}(\xi)}{24}\int_a^b (x-x_1)^4dx$$

Regla de Simpson

- Por el teorema del valor medio ponderado existe $\xi \in [a, b]$, tal que

$$\frac{1}{24}\int_a^b f^{(4)}(\xi_x)(x - x_1)^4 dx = \frac{f^{(4)}(\xi)}{24}\int_a^b (x - x_1)^4 dx$$

- así

$$\int_a^b (x - x_1)^4 dx = \left.\frac{(x - x_1)^5}{5}\right|_a^b$$

Regla de Simpson

- Por el teorema del valor medio ponderado existe $\xi \in [a, b]$, tal que

$$\frac{1}{24}\int_a^b f^{(4)}(\xi_x)(x-x_1)^4 dx = \frac{f^{(4)}(\xi)}{24}\int_a^b (x-x_1)^4 dx$$

- así

$$\int_a^b (x-x_1)^4 dx = \left.\frac{(x-x_1)^5}{5}\right|_a^b$$

- ahora si $x_1 - a = h$, $b - x_1 = h$, entonces

$$\int_a^b (x-x_1)^4 dx = \frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{60}$$

Regla de Simpson

- Entonces la integral queda:

$$\int_a^b f(x)dx = 2hf(x_1) + h^3\frac{f''(x_1)}{3} + \frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{60}$$

Regla de Simpson

- Entonces la integral queda:

$$\int_a^b f(x)dx = 2hf(x_1) + h^3\frac{f''(x_1)}{3} + \frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{60}$$

- conocida la aproximación de $f''(x_1)$ mediante el método de Taylor expandida alrededor de x_1

$$f''(x_1) = \frac{f(x_1+h) - 2f(x_1) + f(x_1-h)}{h^2} - \frac{h^2}{12}f^{(4)}(\xi_1)$$

sustituyendo dicha fórmula en $\int_a^b f(x)dx$

Regla de Simpson

- se obtiene

$$\int_a^b f(x)dx = 2f(x_1)h + \frac{(f(a) - 2f(x_1) + f(b))h}{3} - \frac{f^{(4)}(\xi_1)h^5}{36} + \frac{f^{(4)}(\xi)h^5}{60}$$

Regla de Simpson

- se obtiene

$$\int_a^b f(x)dx = 2f(x_1)h + \frac{(f(a) - 2f(x_1) + f(b))h}{3} - \frac{f^{(4)}(\xi_1)h^5}{36} + \frac{f^{(4)}(\xi)h^5}{60}$$

- de modo que

$$\int_a^b f(x)dx = 2hf(x_1) + \frac{h}{3}\left[f(a) - 2f(x_1) + f(b)\right] - \frac{h^5}{12}\left[\frac{f^{(4)}(\xi_1)}{3} - \frac{f^{(4)}(\xi)}{5}\right]$$

Regla de Simpson

- se obtiene

$$\int_a^b f(x)dx = 2f(x_1)h + \frac{(f(a) - 2f(x_1) + f(b))h}{3} - \frac{f^{(4)}(\xi_1)h^5}{36} + \frac{f^{(4)}(\xi)h^5}{60}$$

- de modo que

$$\int_a^b f(x)dx = 2hf(x_1) + \frac{h}{3}\left[f(a) - 2f(x_1) + f(b)\right] - \frac{h^5}{12}\left[\frac{f^{(4)}(\xi_1)}{3} - \frac{f^{(4)}(\xi)}{5}\right]$$

- Se puede tomar $\xi_1 = \xi$ porque ambas fórmulas provienen del mismo desarrollo de Taylor alrededor de x_1. Por lo tanto:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3}\left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b)\right] - \frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{90}$$

Regla de Simpson 3/8

- Otra regla para aproximar numéricamente la integral es, la regla $\frac{3}{8}$ de Simpson.

Regla de Simpson 3/8

- Otra regla para aproximar numéricamente la integral es, la regla $\frac{3}{8}$ de Simpson.
- sea

$$
\begin{aligned}
f(x) \approx & f(x_0)\frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} + f(x_1)\frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \\
& + f(x_2)\frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)} + f(x_3)\frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)}
\end{aligned}
$$

Regla de Simpson 3/8

- Integrando en el intervalo $[x_0, x_3]$

$$
\begin{aligned}
\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx & \frac{f(x_0)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} \int_{x_0}^{x_3} (x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)dx \\
& + \frac{f(x_1)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \int_{x_0}^{x_3} (x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)dx \\
& + \frac{f(x_2)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)} \int_{x_0}^{x_3} (x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)dx \\
& + \frac{f(x_3)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)} \int_{x_0}^{x_3} (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)dx
\end{aligned}
$$

Regla de Simpson 3/8

- Tomando la sustitución $x = x_0 + uh$ y como $x_i = x_0 + ih$, $i = 1; 2; 3$, entonces $x_3 = x_0 + 3h$, luego si $x = x_0$, se tiene que $u = 0$ y si $x = x_3$, entonces $x_3 = x_0 + uh$, o sea que $x_0 + 3h = x_0 + uh$, de modo que $u = 3$, además $dx = hdu$,

$$
\begin{aligned}
&x - x_1 = x - x_0 - h = uh - h, h = h(u-1), \\
&x - x_2 = x - x_0 - 2h = uh - 2h = h(u-2), \\
&x - x_3 = x - x_0 - 3h = uh - 3h = h(u-3) \text{ y} \\
&x_k - x_j = (k-j)h
\end{aligned}
$$

Regla de Simpson 3/8

- De este modo

$$
\begin{aligned}
\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx & \frac{f(x_0)}{(-h)(-2h)(-3h)} \int_0^3 h(u-1)h(u-2)h(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_1)}{(h)(-h)(-2h)} \int_0^3 uhh(u-2)h(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_2)}{(2h)(h)(-h)} \int_0^3 uhh(u-1)(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_3)}{(3h)(2h)(h)} \int_0^3 uhh(u-1)h(u-2)hdu
\end{aligned}
$$

Regla de Simpson 3/8

- De este modo

$$
\begin{aligned}
\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx & \frac{f(x_0)}{(-h)(-2h)(-3h)} \int_0^3 h(u-1)h(u-2)h(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_1)}{(h)(-h)(-2h)} \int_0^3 uhh(u-2)h(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_2)}{(2h)(h)(-h)} \int_0^3 uhh(u-1)(u-3)hdu \\
& + \frac{f(x_3)}{(3h)(2h)(h)} \int_0^3 uhh(u-1)h(u-2)hdu
\end{aligned}
$$

- luego

$$
\begin{aligned}
\int_{x_0}^{x_3} f(x) \approx & \frac{-h^4 f(x_0)}{6h^3} \int_0^3 (u^3 - 6u^2 + 11u - 6)du + \frac{h^4 f(x_1)}{2h^3} \int_0^3 (u^3 - 5u^2 + 6u)d \\
& + \frac{-h^4 f(x_2)}{2h^3} \int_0^3 (u^3 - 4u^2 + 3u)du + \frac{h^4 f(x_3)}{6h^3} \int_0^3 (u^3 - 3u^2 + 2u)du
\end{aligned}
$$

Regla de Simpson 3/8

- De este modo

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx -\frac{hf(x_0)}{6}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_1)}{2}\frac{9}{4} - \frac{hf(x_2)}{2}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_3)}{6}\frac{9}{4}$$

Regla de Simpson 3/8

- De este modo

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx -\frac{hf(x_0)}{6}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_1)}{2}\frac{9}{4} - \frac{hf(x_2)}{2}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_3)}{6}\frac{9}{4}$$

- luego

$$\int_{x_0}^{x_3} \approx \frac{3hf(x_0)}{8} + \frac{9hf(x_1)}{8} + \frac{9hf(x_2)}{8} + \frac{3hf(x_3)}{8}$$

Regla de Simpson 3/8

- De este modo

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx -\frac{hf(x_0)}{6}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_1)}{2}\frac{9}{4} - \frac{hf(x_2)}{2}\frac{-9}{4} + \frac{hf(x_3)}{6}\frac{9}{4}$$

- luego

$$\int_{x_0}^{x_3} \approx \frac{3hf(x_0)}{8} + \frac{9hf(x_1)}{8} + \frac{9hf(x_2)}{8} + \frac{3hf(x_3)}{8}$$

- así que

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x)dx \approx \frac{3}{8}\left[f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + f(x_3)\right]$$

es la llamada regla de los $\frac{3}{8}$ de Simpson.

Regla de Simpson 3/8

- El análisis del error viene dado en este caso:

$$E \leq \left| \frac{-3}{80} h^5 M_4 \right| = \left| \frac{b-a}{80} h^4 M_4 \right|$$

Regla de Simpson 3/8

- El análisis del error viene dado en este caso:

$$E \leq \left| \frac{-3}{80} h^5 M_4 \right| = \left| \frac{b-a}{80} h^4 M_4 \right|$$

- por lo que, salvo constantes, el orden de precisión (h^4) es el mismo que en el Método de Simpson $\frac{1}{3}$.

Regla de Simpson 3/8

- El análisis del error viene dado en este caso:

$$E \leq \left| \frac{-3}{80} h^5 M_4 \right| = \left| \frac{b-a}{80} h^4 M_4 \right|$$

- por lo que, salvo constantes, el orden de precisión (h^4) es el mismo que en el Método de Simpson $\frac{1}{3}$.
- La principal novedad que aporta este método es que se puede aplicar en caso de tener un número de subintervalos igual a 3 (o en general a cualquier múltiplo de tres).

Fórmulas de Newton-Côtes

- Las fórmulas de cuadratura de Newton-Côtes son fórmulas de cuadratura de tipo interpolatorio obtenidas para nodos igualmente espaciados.

Fórmulas de Newton-Côtes

- Las fórmulas de cuadratura de Newton-Côtes son fórmulas de cuadratura de tipo interpolatorio obtenidas para nodos igualmente espaciados.
- Tal como se ha explicado de forma general cada una de estas fórmulas se calcula integrando el polinomio interpolador correspondiente.

Fórmulas de Newton-Côtes

- Las fórmulas de cuadratura de Newton-Côtes son fórmulas de cuadratura de tipo interpolatorio obtenidas para nodos igualmente espaciados.
- Tal como se ha explicado de forma general cada una de estas fórmulas se calcula integrando el polinomio interpolador correspondiente.
- Existen dos tipos de fórmulas, las cerradas y las abiertas.

Fórmulas de Newton-Côtes

- Las fórmulas de cuadratura de Newton-Côtes son fórmulas de cuadratura de tipo interpolatorio obtenidas para nodos igualmente espaciados.
- Tal como se ha explicado de forma general cada una de estas fórmulas se calcula integrando el polinomio interpolador correspondiente.
- Existen dos tipos de fórmulas, las cerradas y las abiertas.
- Las fórmulas cerradas son aquellas en las que los extremos del intervalo de integración son dos de los nodos utilizados para la obtención de la fórmula, es decir, a y b son dos de los nodos utilizados para calcular el polinomio interpolador que posteriormente será integrado.

Fórmulas de Newton-Côtes

- Las fórmulas de cuadratura de Newton-Côtes son fórmulas de cuadratura de tipo interpolatorio obtenidas para nodos igualmente espaciados.
- Tal como se ha explicado de forma general cada una de estas fórmulas se calcula integrando el polinomio interpolador correspondiente.
- Existen dos tipos de fórmulas, las cerradas y las abiertas.
- Las fórmulas cerradas son aquellas en las que los extremos del intervalo de integración son dos de los nodos utilizados para la obtención de la fórmula, es decir, a y b son dos de los nodos utilizados para calcular el polinomio interpolador que posteriormente será integrado.
- Las fórmulas abiertas son aquellas en las que los extremos del intervalo de integración no forman parte de la fórmula.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

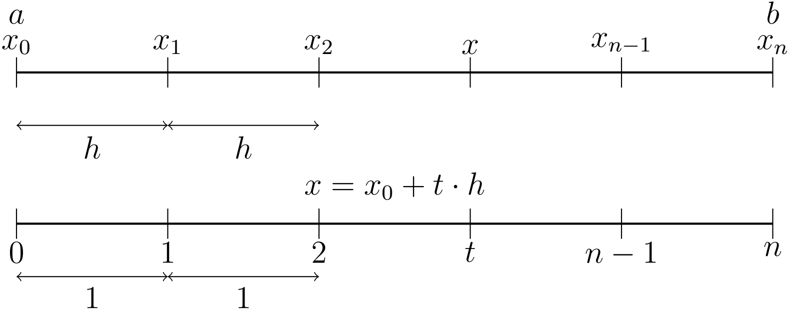
- Tal como se ha explicado, la integral definida entre a y b se puede expresar como: $\int_a^b f(x)dx = \int_a^b p(x)dx + R(f)$, de manera que se aproxima la integral definida mediante la integral del polinomio interpolador que pasa por $n+1$ puntos igualmente espaciados en el intervalo $[a, b]$.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Tal como se ha explicado, la integral definida entre a y b se puede expresar como: $\int_a^b f(x)dx = \int_a^b p(x)dx + R(f)$, de manera que se aproxima la integral definida mediante la integral del polinomio interpolador que pasa por $n+1$ puntos igualmente espaciados en el intervalo $[a, b]$.
- El error cometido se calcula integrando el error del polinomio interpolador en el mismo intervalo.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Para simplificar el cálculo y poder generalizarlo a cualquier intervalo $[a, b]$, se realiza un cambio de variable, tal como se hizo en el tema de interpolación para realizar el cálculo del polinomio interpolador por el método de Newton mediante diferencias finitas.



Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- En el gráfico se puede ver que la distancia entre nodos viene determinada por el valor $h = \frac{b-a}{n}$ y la relación entre la variable x y la variable t permite calcular $dx = h \cdot dt$.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- En el gráfico se puede ver que la distancia entre nodos viene determinada por el valor $h = \frac{b-a}{n}$ y la relación entre la variable x y la variable t permite calcular $dx = h \cdot dt$.
- Realizando este cambio de variable se tiene lo siguiente:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_0^n q(t)hdt + R(f) \Rightarrow \int_0^n q(t)hdt$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- En el gráfico se puede ver que la distancia entre nodos viene determinada por el valor $h = \frac{b-a}{n}$ y la relación entre la variable x y la variable t permite calcular $dx = h \cdot dt$.
- Realizando este cambio de variable se tiene lo siguiente:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_0^n q(t)hdt + R(f) \Rightarrow \int_0^n q(t)hdt$$

- Se debe calcular por tanto la integral

$$\int_0^n q(t)hdt = h\int_0^n q(t)dt$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Siendo

$$q(t) = \sum_{i=0}^{n} \Delta^i f(x_0) \binom{t}{i} \Rightarrow h \int_0^n q(t)dt = h \sum_{i=0}^{n} \Delta^i f(x_0) \int_0^n \binom{t}{i} dt$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Siendo

$$q(t)=\sum_{i=0}^{n}\Delta^i f(x_0)\binom{t}{i}\Rightarrow h\int_0^n q(t)dt=h\sum_{i=0}^{n}\Delta^i f(x_0)\int_0^n\binom{t}{i}dt$$

- Así las fórmulas de integración de Newton Côtes cerradas se obtienen integrando los polinomios interpoladores de Newton mediante diferencias finitas.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Siendo

$$q(t) = \sum_{i=0}^{n} \Delta^i f(x_0) \binom{t}{i} \Rightarrow h \int_0^n q(t)dt = h \sum_{i=0}^{n} \Delta^i f(x_0) \int_0^n \binom{t}{i} dt$$

- Así las fórmulas de integración de Newton Côtes cerradas se obtienen integrando los polinomios interpoladores de Newton mediante diferencias finitas.
- En cuanto al error en la integral, éste se calcula a partir del error cometido al sustituir la función $f(x)$ por el polinomio $p(x)$. En el tema de interpolación se estudio el error cometido mediante la expresión

$$e(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \Pi(x)$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- El error en el cálculo de la integral será por tanto

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \Pi(x) dx$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- El error en el cálculo de la integral será por tanto

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx$$

- Al realizar este estudio. Aparecen dos situaciones distintas, en función del valor que toma n.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Para valores de n impar, se realiza el cálculo mediante el cambio de variable anteriormente explicado

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b \Pi(x)dx$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Para valores de n impar, se realiza el cálculo mediante el cambio de variable anteriormente explicado

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b \Pi(x)dx$$

- Basta saber que $\Pi(x) = (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n)$ y que realizando el cambio de variable $x = x_0 + th$, resulta:

$$(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n) = (ht)h(t-1)h(t-2)\cdots h(t-n)$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Para valores de n impar, se realiza el cálculo mediante el cambio de variable anteriormente explicado

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b \Pi(x)dx$$

- Basta saber que $\Pi(x) = (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n)$ y que realizando el cambio de variable $x = x_0 + th$, resulta:

$$(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n) = (ht)h(t-1)h(t-2)\cdots h(t-n)$$

- Por lo tanto:

$$R(f) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b h^{n+1}t(t-1)(t-2)\cdots(t-n)hdt = K\frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}h^{n+2}$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- En el caso de fórmulas en las que n es par, si se realiza de la misma forma el cálculo,

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b \Pi(x)dx$$

El resultado de la integral es cero.

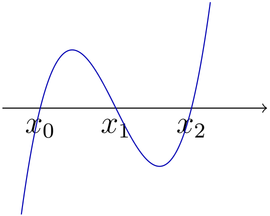
Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

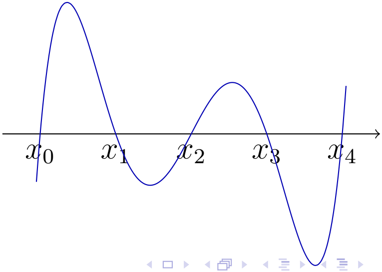
- En el caso de fórmulas en las que n es par, si se realiza de la misma forma el cálculo,

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\Pi(x)dx = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}\int_a^b \Pi(x)dx$$

  El resultado de la integral es cero.

- La integral se anula ya que se trata de integrar un polinomio que tiene $n+1$ raíces distintas, igualmente espaciadas en el intervalo $[a, b]$





Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Esto quiere decir que las fórmulas de integración de Newton Cotes en las que n es par, son de orden $n+1$, puesto que el error no es función de $f^{(n+1)}(\xi)$, sino que será función de $f^{(n+2)}(\xi)$.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Esto quiere decir que las fórmulas de integración de Newton Cotes en las que n es par, son de orden $n+1$, puesto que el error no es función de $f^{(n+1)}(\xi)$, sino que será función de $f^{(n+2)}(\xi)$.
- El error no está en un polinomio de grado $n+1$ ($\Pi(x)$) sino en un polinomio de grado $n+2$.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Esto quiere decir que las fórmulas de integración de Newton Cotes en las que n es par, son de orden $n+1$, puesto que el error no es función de $f^{(n+1)}(\xi)$, sino que será función de $f^{(n+2)}(\xi)$.
- El error no está en un polinomio de grado $n+1$ $(\Pi(x))$ sino en un polinomio de grado $n+2$.
- Este polinomio es $x \cdot \Pi(x)$.

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Esto quiere decir que las fórmulas de integración de Newton Cotes en las que n es par, son de orden $n+1$, puesto que el error no es función de $f^{(n+1)}(\xi)$, sino que será función de $f^{(n+2)}(\xi)$.
- El error no está en un polinomio de grado $n+1$ $(\Pi(x))$ sino en un polinomio de grado $n+2$.
- Este polinomio es $x \cdot \Pi(x)$.
- El error se calcula mediante la expresión :

$$R(f) = \int_a^b \frac{f^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!} x \cdot \Pi(x) dx$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

- Para realizar este cálculo se procede mediante el cambio de variable ya utilizado $x = x_0 + ht$, con lo que la expresión resultante es:

$$
\begin{aligned}
R(f) = &\int_0^n \frac{f^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!} (x_0 + ht) \left[(ht)h(t-1)h(t-2)\cdots h(t-n)\right] hdt \\
=&\frac{f^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!} \int_0^n (x_0)[(ht)h(t-1)h(t-2)\cdots h(t-n)]hdt + \\
&\frac{f^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!} \int_0^n (ht)h(t-1)h(t-2)\cdots h(t-n)hdt \\
=&0 + \frac{f^{(n+2)}(\xi)}{(n+2)!} h^{n+3} \int_0^n t^2(t-1)\cdots(t-n)dt
\end{aligned}
$$

Fórmulas Cerradas de Newton-Côtes

En la siguiente tabla se detallan las constantes y la expresión del error correspondientes a varios órdenes diferentes:

n	α	$w_j, \quad j = 0, 1, \ldots, n$	E
1	$\frac{1}{2}$	1 1	$-\frac{h^3}{12}f''(\xi)$
2	$\frac{1}{3}$	1 4 1	$-\frac{h^5}{90}f^{(4)}(\xi)$
3	$\frac{3}{8}$	1 3 3 1	$-\frac{3h^5}{80}f^{(4)}(\xi)$
4	$\frac{2}{45}$	7 32 12 32 7	$-\frac{8h^7}{945}f^{(6)}(\xi)$
5	$\frac{5}{288}$	19 75 50 50 75 19	$-\frac{275h^7}{12096}f^{(6)}(\xi)$
6	$\frac{1}{140}$	41 216 27 272 27 216 41	$-\frac{9h^9}{1400}f^{(8)}(\xi)$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Las fórmulas abiertas son aquellas en que los extremos del intervalo de integración no forman parte de la fórmula.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Las fórmulas abiertas son aquellas en que los extremos del intervalo de integración no forman parte de la fórmula.
- El proceso de cálculo de las fórmulas abiertas es idéntico al de las fórmulas cerradas, salvo en dos cuestiones.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Las fórmulas abiertas son aquellas en que los extremos del intervalo de integración no forman parte de la fórmula.
- El proceso de cálculo de las fórmulas abiertas es idéntico al de las fórmulas cerradas, salvo en dos cuestiones.
- En primer lugar, dado que no interviene los extremos del intervalo en la fórmula, se puede comenzar trabajando con una fórmula en que solo intervenga un nodo ($n = 0$).

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Las fórmulas abiertas son aquellas en que los extremos del intervalo de integración no forman parte de la fórmula.
- El proceso de cálculo de las fórmulas abiertas es idéntico al de las fórmulas cerradas, salvo en dos cuestiones.
- En primer lugar, dado que no interviene los extremos del intervalo en la fórmula, se puede comenzar trabajando con una fórmula en que solo intervenga un nodo ($n = 0$).
- Por otro lado, dado que los extremos del intervalo no forman parte de la fórmula, al realizar el cambio de variable para integrar el polinomio interpolador, los extremos del intervalo no serán 0 y n como veremos más adelante.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Para realizar el cálculo de las fórmulas, se cambia a la variable t. Los nodos está igualmente espaciados y separados una distancia h.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

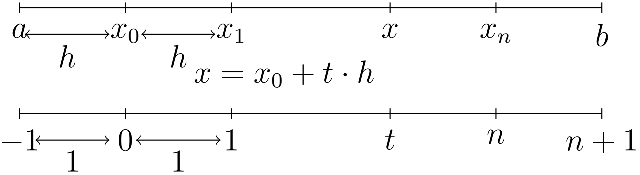
- Para realizar el cálculo de las fórmulas, se cambia a la variable t. Los nodos está igualmente espaciados y separados una distancia h.
- De forma general, el valor de h se calcula como $h = \frac{b-a}{n+2}$ debido a que los extremos del intervalo no forman parte de la fórmula.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Para realizar el cálculo de las fórmulas, se cambia a la variable t. Los nodos está igualmente espaciados y separados una distancia h.
- De forma general, el valor de h se calcula como $h = \frac{b-a}{n+2}$ debido a que los extremos del intervalo no forman parte de la fórmula.
- Como el extremo inferior del intervalo no forma parte de la fórmula de integración, x_0 es por tanto $a + h$.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Para realizar el cálculo de las fórmulas, se cambia a la variable t. Los nodos está igualmente espaciados y separados una distancia h.
- De forma general, el valor de h se calcula como $h = \frac{b-a}{n+2}$ debido a que los extremos del intervalo no forman parte de la fórmula.
- Como el extremo inferior del intervalo no forma parte de la fórmula de integración, x_0 es por tanto $a + h$.
- Por tanto en la variable t el intervalo de integración va desde -1 hasta $n + 1$.

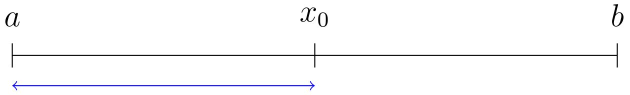


Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- En cuanto a la expresión del error cometido al realizar el cálculo de la integral, sucede lo mismo que en las formulas cerradas.
- Al tratarse de nodos igualmente espaciados, las fórmulas de integración con n par, son de orden $n+1$ mientras que las formulas de integración con n impar son de orden n.
- El cálculo se realiza de la misma manera que se realizó para las fórmulas cerradas, salvo que los extremos del intervalo de integración son -1 y $n+1$.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

Para $n = 0$ (Fórmula del Punto Medio)

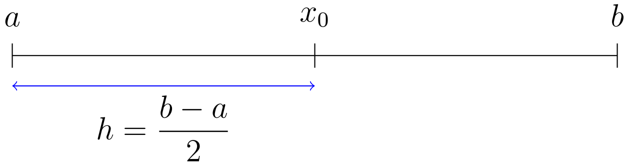


$$h = \frac{b-a}{2}$$

- Solamente hay un nodo, por tanto el polinomio interpolador que se obtiene es una constante $q(t) = f(x_0)$.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

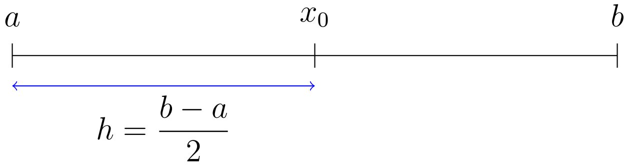
Para $n = 0$ (Fórmula del Punto Medio)



- Solamente hay un nodo, por tanto el polinomio interpolador que se obtiene es una constante $q(t) = f(x_0)$.
- Tal como se aprecia en el gráfico, el valor de h es $\frac{b-a}{2}$. En general, para cualquier fórmula abierta, $h = \frac{b-a}{n+2}$.

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

Para $n = 0$ (Fórmula del Punto Medio)



- Solamente hay un nodo, por tanto el polinomio interpolador que se obtiene es una constante $q(t) = f(x_0)$.
- Tal como se aprecia en el gráfico, el valor de h es $\frac{b-a}{2}$. En general, para cualquier fórmula abierta, $h = \frac{b-a}{n+2}$.
- La fórmula de integración se obtiene como:

$$I = \int_{-1}^{1} q(t) h dt = h \int_{-1}^{1} f(x_0) dt = h f(x_0) t\Big|_{-1}^{1} = 2h f(x_0)$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- El error en la fórmula se calcula como en las fórmulas en las que n es par:

$$\begin{aligned}
R(f) &= \int_a^b \frac{f''(\xi)}{2!} x\Pi(x)dx = \frac{f''(\xi)}{2!}\int_a^b x(x-x_0)dx \\
&= \frac{f''(\xi)}{2}\int_{-1}^{1}(x_0+th)(th)hdt \\
&= \frac{f''(\xi)}{2}h^2\int_{-1}^{1}(x_0)tdt + \frac{f''(\xi)}{2}h^3\int_{-1}^{1}t^2dt \\
&= \frac{f''(\xi)}{2}h^3\int_{-1}^{1}t^2dt
\end{aligned}$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- El error en la fórmula se calcula como en las fórmulas en las que n es par:

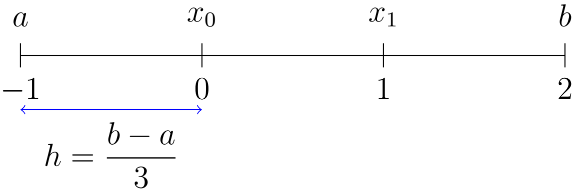
$$\begin{aligned}
R(f) &= \int_a^b \frac{f''(\xi)}{2!} x\Pi(x)dx = \frac{f''(\xi)}{2!} \int_a^b x(x-x_0)dx \\
&= \frac{f''(\xi)}{2} \int_{-1}^{1} (x_0+th)(th)hdt \\
&= \frac{f''(\xi)}{2} h^2 \int_{-1}^{1} (x_0)tdt + \frac{f''(\xi)}{2} h^3 \int_{-1}^{1} t^2dt \\
&= \frac{f''(\xi)}{2} h^3 \int_{-1}^{1} t^2dt
\end{aligned}$$

- Por lo tanto:

$$R(f) = \frac{f''(\xi)}{2} h^3 \frac{t^3}{3}\Big|_{-1}^{1} = \frac{h^3 f''(\xi)}{3}$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

Para $n = 1$



- El polinomio interpolador en este caso, en variable t es:

$$q(t) = f(x_0)\binom{t}{0} + \Delta f(x_0)\binom{t}{1} = f(x_0) + (f(x_1) - f(x_0))\,t$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- La fórmula de integración resulta por tanto:

$$
\begin{aligned}
I &= \int_{-1}^{2} \left(f(x_0) + \left(f(x_1) - f(x_0)\right) t\right) h dt \\
&= h\, f(x_0)t + \left(f(x_1) - f(x_0)\right) \frac{t^2}{2}\bigg|_{-1}^{2} = \frac{3h}{2}\left(f(x_1) + f(x_0)\right)
\end{aligned}
$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- La fórmula de integración resulta por tanto:

$$
\begin{aligned}
I &= \int_{-1}^{2} \left(f(x_0) + (f(x_1) - f(x_0))\, t\right) h dt \\
&= h\ f(x_0)t + (f(x_1) - f(x_0)) \left.\frac{t^2}{2}\right|_{-1}^{2} = \frac{3h}{2}\left(f(x_1) + f(x_0)\right)
\end{aligned}
$$

- El error de la fórmula se obtiene como:

$$
R(f) = \int_a^b \frac{f''(\xi)}{2!} \Pi(x) dx = \frac{f''(\xi)}{2} \int_a^b (x - x_0)(x - x_1) dx
$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

- Haciendo el cambio de variable resulta:

$$R(f) = \frac{f''(\xi)}{2}\int_{-1}^{2} hth(t-1)hdt = \frac{f''(\xi)}{2}h^3\int_{-1}^{2} t(t-1)dt = \frac{3h^3 f''(\xi)}{4}$$

- La fórmula completa es:

$$I = \frac{3h}{2}\left(f(x_1) + f(x_0)\right) + \frac{3h^3 f''(\xi)}{4}$$

Fórmulas Abiertas de Newton-Côtes

Se puede escribir entonces, de manera general:

$$\int_a^b f(x)dx = \alpha(w_1 y_1 + \cdots + w_{n+1} y_{n+1}) + E$$

siendo $h = \frac{b-a}{n+2}$, y denotando E el error de integración.

n	α	$w_j,\ j = 0, 1, \ldots, n$	E
0	2	1	$\frac{h^3 f''(\xi)}{3}$
1	$\frac{3}{2}$	1, 1	$\frac{3h^3}{4} f''(\xi)$
2	$\frac{4}{3}$	2, -1, 2	$\frac{28h^5}{90} f^{(4)}(\xi)$
3	$\frac{5}{24}$	11, 1, 1, 11	$\frac{95h^5}{144} f^{(4)}(\xi)$
4	$\frac{6}{20}$	11, -14, 26, -14, 11	$\frac{41h^7}{140} f^{(6)}(\xi)$
5	$\frac{7}{1440}$	611, -453, 562, 562, -453, 611	$\frac{5257h^7}{8640} f^{(6)}(\xi)$
6	$\frac{3956}{14175}$	460, -954, 2196, -2459, 2196, -954, 460	$\frac{9h^9}{1400} f^{(8)}(\xi)$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Tal como se ha podido ver en el estudio de las fórmulas de cuadratura de Newton-Cotes, cuando la fórmula de integración es de orden p, el error cometido es:

$$R(f) = \frac{Kh^{p+2}f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Tal como se ha podido ver en el estudio de las fórmulas de cuadratura de Newton-Cotes, cuando la fórmula de integración es de orden p, el error cometido es:

$$R(f) = \frac{Kh^{p+2} f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

- El único valor sobre el que se puede actuar para disminuir el error es h. Para disminuir el error, por tanto se deberá disminuir el valor de h, lo que implica aumentar el número de nodos de la fórmula.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Tal como se ha podido ver en el estudio de las fórmulas de cuadratura de Newton-Cotes, cuando la fórmula de integración es de orden p, el error cometido es:

$$R(f) = \frac{Kh^{p+2}f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

- El único valor sobre el que se puede actuar para disminuir el error es h. Para disminuir el error, por tanto se deberá disminuir el valor de h, lo que implica aumentar el número de nodos de la fórmula.
- Sin embargo, aumentar el número de nodos de la fórmula no implica disminuir el error, para un número elevado de nodos, el proceso de integración es inestable.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Tal como se ha podido ver en el estudio de las fórmulas de cuadratura de Newton-Cotes, cuando la fórmula de integración es de orden p, el error cometido es:

$$R(f) = \frac{Kh^{p+2}f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

- El único valor sobre el que se puede actuar para disminuir el error es h. Para disminuir el error, por tanto se deberá disminuir el valor de h, lo que implica aumentar el número de nodos de la fórmula.
- Sin embargo, aumentar el número de nodos de la fórmula no implica disminuir el error, para un número elevado de nodos, el proceso de integración es inestable.
- La manera de disminuir el valor de h, es creando subintervalos dentro del intervalo $[a, b]$, y aplicando fórmulas de integración sencillas en cada subintervalo.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Por tanto las fórmulas de Newton-Côtes compuestas se calculan de la siguiente manera:

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=1}^{N} I_i + \sum_{i=1}^{N} R_i(f)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Por tanto las fórmulas de Newton-Côtes compuestas se calculan de la siguiente manera:

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=1}^{N} I_i + \sum_{i=1}^{N} R_i(f)$$

- Cada una de las fórmulas I_i, pueden ser diferentes, pero el orden de las fórmulas será distinto, con lo que en unas zonas del intervalo, el error cometido será mayor que en otras.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Por tanto las fórmulas de Newton-Côtes compuestas se calculan de la siguiente manera:

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=1}^{N} I_i + \sum_{i=1}^{N} R_i(f)$$

- Cada una de las fórmulas I_i, pueden ser diferentes, pero el orden de las fórmulas será distinto, con lo que en unas zonas del intervalo, el error cometido será mayor que en otras.
- Para evitar esto, se utiliza la misma fórmula repetida N veces, utilizando de este modo el mismo valor de h en el intervalo, lo que simplifica los cálculos.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Por tanto las fórmulas de Newton-Côtes compuestas se calculan de la siguiente manera:

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=1}^{N} I_i + \sum_{i=1}^{N} R_i(f)$$

- Cada una de las fórmulas I_i, pueden ser diferentes, pero el orden de las fórmulas será distinto, con lo que en unas zonas del intervalo, el error cometido será mayor que en otras.
- Para evitar esto, se utiliza la misma fórmula repetida N veces, utilizando de este modo el mismo valor de h en el intervalo, lo que simplifica los cálculos.
- Este proceso también homogeniza el error cometido a lo largo de todo el intervalo [a,b].

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Cuando se aplican estas fórmulas, el error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{Kh^{p+2} f^{(p+1)}(\xi_i)}{(p+1)!} = \frac{Kh^{p+2}}{(p+1)!} \sum_{i=1}^{N} f^{(p+1)}(\xi_i)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Cuando se aplican estas fórmulas, el error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{Kh^{p+2} f^{(p+1)}(\xi_i)}{(p+1)!} = \frac{Kh^{p+2}}{(p+1)!} \sum_{i=1}^{N} f^{(p+1)}(\xi_i)$$

- En cada subintervalo existe un valor ξ_i para el que se calcula la derivada $p+1$.

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Cuando se aplican estas fórmulas, el error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{Kh^{p+2} f^{(p+1)}(\xi_i)}{(p+1)!} = \frac{Kh^{p+2}}{(p+1)!} \sum_{i=1}^{N} f^{(p+1)}(\xi_i)$$

- En cada subintervalo existe un valor ξ_i para el que se calcula la derivada $p+1$.
- En el intervalo total [a,b] existe algun punto ξ para el cual

$$\sum_{i=1}^{N} f^{(p+1)}(\xi_i) = N f^{(p+1)}(\xi)$$

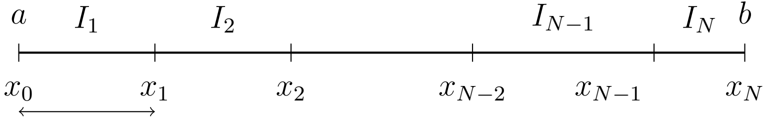
con lo que la expresión de error queda de la forma:

$$R(f) = N \frac{Kh^{p+2}}{(p+1)!} f^{p+1}(\xi)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

Fórmulas Cerradas

$n = 1$. Fórmula del trapecio

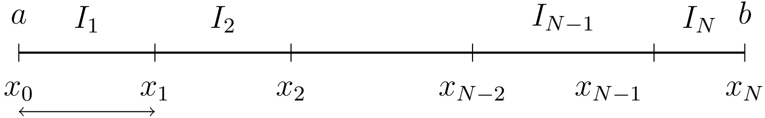


$$h = \frac{b-a}{N}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

Fórmulas Cerradas

$n = 1$. Fórmula del trapecio



$$h = \frac{b-a}{N}$$

- La fórmula del trapecio viene dada por

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x)dx = \frac{h}{2}\left(f(x_0) + f(x_1)\right) - \frac{h^3 f''(\xi)}{12}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Subdiviendo N veces el intervalo $[a, b]$, resulta:

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx &= \int_{x_0}^{x_1} f(x)dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + \cdots + \int_{x_{N-1}}^{x_N} f(x)dx \\ &= \frac{h}{2}\left(f(x_0) + f(x_1)\right) + \frac{h}{2}\left(f(x_1) + f(x_2)\right) + \cdots + \frac{h}{2}\left(f(x_{N-1}) + f(x_N)\right) + R(f) \\ &= \frac{h}{2}\left[f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \cdots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N)\right] + R(f)\end{aligned}$$

- El error cometido será:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} -\frac{h^3 f''(\xi_i)}{12} = -\frac{h^3}{12}\sum_{i=1}^{N} f''(\xi_i)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- El valor de h en las fórmulas cerradas es $h = \frac{b-a}{N \cdot n}$ y en particular para la regla del trapecio compuesta será $h = \frac{b-a}{N}$, por lo que el error resulta:

$$R(f) = -N\frac{h^3}{12}f''(\xi) = -\frac{(b-a)h^2}{12}f''(\xi)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- El valor de h en las fórmulas cerradas es $h = \frac{b-a}{N \cdot n}$ y en particular para la regla del trapecio compuesta será $h = \frac{b-a}{N}$, por lo que el error resulta:

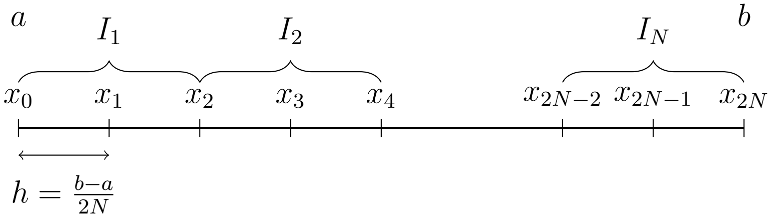
$$R(f) = -N\frac{h^3}{12}f''(\xi) = -\frac{(b-a)h^2}{12}f''(\xi)$$

- La formula compuesta del trapecio es por lo tanto:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{2}\left[f(x_0) + f(x_N) + 2\sum_{i=1}^{N-1} f(x_i)\right] - \frac{(b-a)h^2}{12}f''(\xi)$$

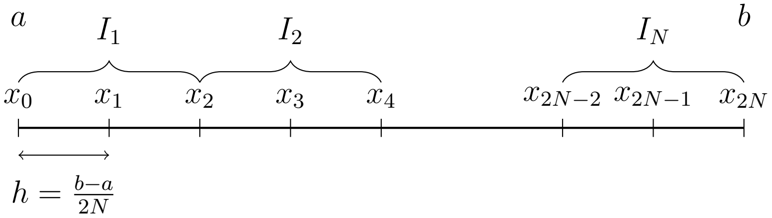
Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

$n = 2.$ Fórmula de Simpson 1/3



Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

$n = 2$. Fórmula de Simpson 1/3



- La fórmula de Simpson viene dada por

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx = \frac{h}{3}\left(f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)\right) - \frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{90}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Creando una partición del intervalo $[a, b]$ en N subintervalos, se tiene que:

$$
\begin{aligned}
\int_a^b f(x)dx =& \int_{x_0}^{x_2} f(x)dx + \int_{x_2}^{x_4} f(x)dx + \cdots + \int_{x_{2N-2}}^{x_{2N}} f(x)dx \\
=& \frac{h}{3}\left(f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)\right) + \frac{h}{3}\left(f(x_2) + 4f(x_3) + f(x_4)\right) + \\
& \cdots + \frac{h}{3}\left(f(x_{2N-2}) + 4f(x_{2N-1}) + f(x_{2N})\right) \\
=& \frac{h}{3}\left[f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \cdots \right. \\
& \left. + 2f(x_{2N-2}) + 4f(x_{2N-1}) + f(x_{2N})\right] + R(f) \\
=& \frac{h}{3}\left[f(x_0) + f(x_{2N}) + 4\sum_{i=1}^{N} f(x_{2i-1}) + 2\sum_{i=1}^{N-1} f(x_{2i})\right] + R(f)
\end{aligned}
$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- En cuanto al error cometido, se tiene que:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} -\frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{90} = -\frac{h^5}{90} \sum_{i=1}^{N} f^{(4)}(\xi_i)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- En cuanto al error cometido, se tiene que:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} -\frac{h^5 f^{(4)}(\xi)}{90} = -\frac{h^5}{90}\sum_{i=1}^{N} f^{(4)}(\xi_i)$$

- ¿El valor de h para la fórmula compuesta viene dada por $h = \frac{b-a}{2N}$, por lo tanto

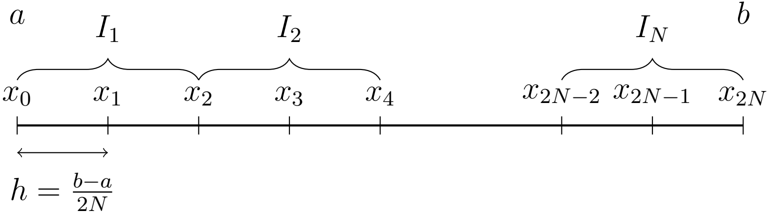
$$R(f) = -N\frac{h^5}{90} f^{(4)}(\xi) = -\frac{(b-a)h^4}{180} f^{(4)}(\xi)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

Fórmulas abiertas

n=0; Fórmula del punto medio.

- En las fórmulas abiertas, el valor de $h = \frac{b-a}{N(n+2)}$ y el gráfico para esta fórmula es



- La regla del punto medio es:

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx = 2hf(x_1) + \frac{h^3 f''(\xi)}{3}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- Particionando el intervalo $[a, b]$ en N subintervalos, resulta

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx =& \int_{x_0}^{x_2} f(x)dx + \int_{x_2}^{x_4} f(x)dx + \cdots + \int_{x_{2N-2}}^{x_{2N}} f(x)dx \\ =& 2hf(x_1) + 2hf(x_3) + \cdots + 2hf(x_{2N-1}) + R(f) \\ =& 2h\sum_{i=1}^{N} f(x_{2i-1}) + R(f)\end{aligned}$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- El error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{h^3 f''(\xi)}{3} = \frac{h^3}{3} \sum_{i=1}^{N} f''(\xi_i)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- El error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{h^3 f''(\xi)}{3} = \frac{h^3}{3} \sum_{i=1}^{N} f''(\xi_i)$$

- El valor de h en la fórmula compuesta es $h = \frac{b-a}{2N}$, por lo tanto:

$$R(f) = N\frac{h^3}{3} f''(\xi) = \frac{(b-a)h^2}{6} f''(\xi)$$

Fórmulas de Newton-Côtes Compuestas

- El error cometido es:

$$R(f) = \sum_{i=1}^{N} R_i(f) = \sum_{i=1}^{N} \frac{h^3 f''(\xi)}{3} = \frac{h^3}{3} \sum_{i=1}^{N} f''(\xi_i)$$

- El valor de h en la fórmula compuesta es $h = \frac{b-a}{2N}$, por lo tanto:

$$R(f) = N\frac{h^3}{3} f''(\xi) = \frac{(b-a)h^2}{6} f''(\xi)$$

- La fórmula compuesta del punto medio es por lo tanto:

$$\int_a^b f(x)dx = 2h \sum_{i=1}^{N} f(x_{2i-1}) + \frac{(b-a)h^2}{6} f''(\xi)$$

Método de Integración de Romberg

- Como sde ha visto la regla del trapecio proporciona la aproximación de una integral con un error considerablemente grande

Método de Integración de Romberg

- Como sde ha visto la regla del trapecio proporciona la aproximación de una integral con un error considerablemente grande
- El método de Romberg busca mejorar el procedimiento y hacerlo más eficiente.

Método de Integración de Romberg

- Como sde ha visto la regla del trapecio proporciona la aproximación de una integral con un error considerablemente grande
- El método de Romberg busca mejorar el procedimiento y hacerlo más eficiente.
- Consideremos la regla compuesta con nodos $n_1 = 1$; $n_2 = 2$; $n_3 = 4; \cdots ; n_i = 2^{i-1}$, la cual viene dada por

$$\int_a^b f(x) = \frac{h_i}{2}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{i=1}^{2^{i-1}-1} f(x_i)\right] - \frac{(b-a)h_i^2}{12} f''(\xi)$$

con $h_i = \dfrac{b-a}{2^{i-1}}$ y $x_k = a + kh_i$

Método de Integración de Romberg

- Sea

$$R(i,1) = \frac{h_i}{2}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{k=1}^{2^{i-1}-1} f(a + kh_i)\right]$$

Método de Integración de Romberg

- Sea

$$R(i,1) = \frac{h_i}{2}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{k=1}^{2^{i-1}-1} f(a + kh_i)\right]$$

- entonces

$$R(1,1) = \frac{h_1}{2}\left[f(a) + f(b)\right]$$

pero $h_1 = b - a$, entonces

$$R(1,1) = \frac{b-a}{2}\left[f(a) + f(b)\right]$$

Método de Integración de Romberg

- Ahora, tomando $h_2 = \frac{b-a}{2}$

$$
\begin{aligned}
R(2,1) &= \frac{h_2}{2}\left[f(a) + f(b) + 2f(a+h_2)\right] \\
&= \frac{b-a}{4}\left[f(a) + f(b)\right] + 2\frac{b-a}{4} f(a+h_2) \\
&= \frac{b-a}{4}\left[f(a) + f(b)\right] + \frac{b-a}{2} f(a+h_2) \\
&= \frac{1}{2}\left[\frac{b-a}{2}\left(f(a) + f(b)\right) + (b-a) f(a+h_2)\right] \\
R(2,1) &= \frac{1}{2}\left[R(1,1) + h_1 f(a+h_2)\right]
\end{aligned}
$$

Método de Integración de Romberg

- Ahora, tomando $h_3 = \frac{b-a}{4}$

$$
\begin{aligned}
R(3,1) &= \frac{h_3}{2}\left[f(a) + f(b) + 2\sum_{k=1}^{4-1} f(a+kh_3)\right] \\
&= \frac{h_3}{2}\left[f(a) + f(b) + 2(f(a+h_3) + f(a+2h_3) + f(a+3h_3))\right] \\
&= \frac{h_3}{2}\left[f(a) + f(b) + 2f\left(a + 2\frac{b-a}{4}\right) + 2\left(f(a+h_3) + f(a+3h_3)\right)\right] \\
&= \frac{h_3}{2}\left[f(a) + f(b) + 2f\left(a + \frac{b-a}{2}\right) + 2\left(f(a+h_3) + f(a+3h_3)\right)\right] \\
&= \frac{b-a}{8}\left[f(a) + f(b) + 2f(a+h_2) + 2(f(a+h_3) + f(a+3h_3))\right]
\end{aligned}
$$

$$
= \frac{1}{2}\left[\frac{b-a}{4}\left(f(a) + f(b)\right) + \frac{b-a}{2} f(a+h_2) + \frac{b-a}{2}(f(a+h_3) + f(a+3h_3))\right]
$$

Método de Integración de Romberg

- Por lo tanto se tiene que

$$R(3,1) = \frac{1}{2}\left[R(2,1) + h_2(f(a+h_3) + f(a+3h_3))\right]$$

Método de Integración de Romberg

- Por lo tanto se tiene que

$$R(3,1) = \frac{1}{2}\left[R(2,1) + h_2(f(a+h_3) + f(a+3h_3))\right]$$

- Continuando con este proceso se tiene que

$$R(k,1) = \frac{1}{2}\left[R(k-1,1) + h_{k-1}\sum_{i=1}^{2^{k-2}} f(a+(2i-1)h_k)\right]$$

Método de Integración de Romberg

- Con el fin de acelerar el método de Romberg, es común usar el proceso de extrapolación de Richardson.

Método de Integración de Romberg

- Con el fin de acelerar el método de Romberg, es común usar el proceso de extrapolación de Richardson.
- Sea $f \in C^{\infty}[a,b]$, se puede probar que la regla compuesta del trapecio se puede escribir como

$$\int_a^b f(x)dx - R(k,1) = a_1 h^2 + a_2 h^4 + a_3 h^6 + \cdots$$

- Reemplazando k por $k+1$ y h por $h/2$, se tiene que

$$\int_a^b f(x)dx - R(k+1,1) = a_1 \frac{h^2}{4} + a_2 \frac{h^4}{16} + a_3 \frac{h^6}{64} + \cdots$$

Método de Integración de Romberg

- Con el fin de acelerar el método de Romberg, es común usar el proceso de extrapolación de Richardson.
- Sea $f \in C^{\infty}[a,b]$, se puede probar que la regla compuesta del trapecio se puede escribir como

$$\int_a^b f(x)dx - R(k,1) = a_1h^2 + a_2h^4 + a_3h^6 + \cdots$$

- Reemplazando k por $k+1$ y h por $h/2$, se tiene que

$$\int_a^b f(x)dx - R(k+1,1) = a_1\frac{h^2}{4} + a_2\frac{h^4}{16} + a_3\frac{h^6}{64} + \cdots$$

- Multoplicando esta última ecuacion por 4 restando la anterior queda que:

$$3\int_a^b f(x)dx - 4R(k+1,1) + R(k,1) = a_2\left(\frac{h^4}{4} - h^4\right) + a_3\left(\frac{h^6}{16} - h^6\right) + \cdots$$

Método de Integración de Romberg

- Por lo tanto

$$\int_a^b f(x)dx - \left[R(k+1,1) + \frac{R(k+1,1) - R(k,1)}{3} \right] = -\frac{a_2 h^4}{4} - \frac{5a_3 h^6}{16} +$$

$$\int_a^b f(x)dx = R(k,2) - \frac{a_2 h^4}{4} - \frac{5a_3 h^6}{16} + \cdots$$

- donde

$$R(k,2) = \frac{4R(k+1,1) - R(k,1)}{4-1}$$

- que al reescribirlo queda como

$$R(k,2) = \frac{4R(k,1) - R(k-1,1)}{4-1}$$

Método de Integración de Romberg

- Se puede repetir el procedimiento para eliminar el termino h^4, reemplazando k por $k+1$ y h por $h/2$

$$\int_a^b f(x)dx = R(k+1,2) - a_2\frac{h^4}{64} - a_3\frac{5h^6}{1024} + \cdots$$

- restando 16 veces esta ecuación a la anterior se tiene que

$$15\int_a^b f(x)dx = 16R(k+1,2) - R(k,2) + \cdots$$

- y por tanto

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{16R(k+1,2) - R(k,2)}{15} + \cdots$$

- Por lo tanto

$$\int_a^b f(x)dx = R(k,3) + \cdots$$

Método de Integración de Romberg

- Continuando con el proceso se tiene que

$$R(k,i) = \frac{4^{i-1}R(k,i-1) - R(k-1,i-1)}{4^{i-1}-1}$$

- El cálculo de los valores $R(k,i)$ se suele representar en forma de tabla.

k	$O(h^2)$	$O(h^4)$	$O(h^6)$	$O(h^8)$	$\cdots$	$O(h^{2n})$
1	$R(1,1)$					
2	$R(2,1)$	$R(2,2)$				
3	$R(3,1)$	$R(3,2)$	$R(3,3)$			
4	$R(4,1)$	$R(4,2)$	$R(4,3)$	$R(4,4)$		
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	
n	$R(n,1)$	$R(n,2)$	$R(n,3)$	$R(n,4)$	$\cdots$	$R(n,n)$